

变频器应用教程

张燕宾 编著

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



变频器应用教程

第2版

张燕宾 编著



机械工业出版社

本书介绍了低压变频器的基本原理及其主要功能,讲述了异步电动机的变频调速系统在使用过程中需要注意的问题,并具体分析了变频调速系统在不同类型负载中应用的要点,论述了变频调速的经济效益。除此以外,本书还介绍了变频器内部的控制电路,并且较详细地讲解了变频器维修方面的一些问题。

图书在版编目(CIP)数据

变频器应用教程/张燕宾编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2011.5

ISBN 978-7-111-34130-7

I. ①变… II. ①张… III. ①变频器—教材 IV. ①TN773

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第063325号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李振标 责任编辑:李振标

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年6月第2版第1次印刷

140mm×203mm·11.625印张·226千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34130-7

定价:40.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

《变频器应用教程》第1版自2007年出版以来，已经过去了四年。

在这四年中，我既没有停止过讲课，也没有停止过写作。在不停地讲和写的过程中，我对讲解的内容进行了无数次的修改和重新梳理。在许多方面，现在的讲稿和那时相比，早已面目全非了。

近年来，出版了一些涉及变频器内部控制电路的书，这方面的内容，往往是读者非常希望了解的。为了满足读者的要求，本书增加了一章，专门介绍变频器的内部控制电路。与此同时，也增加了一些维修方面的内容。

本书原是专为培训班而写的，但不少中等专业学校和高等职业学校也拿它作教材。一些学校的老师们提出，希望能增加一些实验的内容。我在研究所也曾经开设过一些实验，于是把相关的实验内容增添在附录里。除此以外，我曾自己制作过一些与变频器配合的仪表和器材，也在附录中介绍给广大读者。

我对自己所写的书，有一个定位，或者说，有一个努力方向。那就是：尽量通俗，尽量结合实际，以帮助从事这方面工作的工程师们能够比较轻松地掌握变频调速技术。因此，我在作图方面是下了一番工夫的。甚至可以说，我写书过程中的大部分精力，是在对图解的构思上。看起来，这很浪费时间，然而我的体会却是：当你准确地作图时，你常常会对相关问题的理解有所加深。于是，我这头老黄牛又倍添了不少继续耕作的勇气。

目 录

前言

第 1 章 变频器主电路	1
1.1 三相交流异步电动机简介	1
1.2 电动机在能量转换中的平衡关系	5
1.3 交-直-交变频器	14
1.4 变频器的输出电压与频率	22
1.5 交-直-交变频器的主电路	31
1.6 变频器各环节电流	36
1.7 变频器的功率因数	41
1.8 载波频率及其影响	45
第 2 章 变频器的常用功能	51
2.1 变频器的控制方式	51
2.2 V/F 控制方式	56
2.3 U/f 线的选择与调整	59
2.4 矢量控制和直接转矩控制方式	63
2.5 变频器频率给定功能	72
2.6 电动机加速和起动	79
2.7 变频减速和制动	84
2.8 制动电阻和制动单元	89
2.9 预置加、减速时间的依据	94
第 3 章 变频器的外部控制	99
3.1 变频器的外接主电路	99
3.2 电动机起动和停机控制	104
3.3 外接数字量加、减速的应用	108
3.4 多挡转速控制	112
3.5 输出控制端子及其应用	116
3.6 多单元拖动系统的同步控制	120

3.7 变频和工频切换控制	124
3.8 变频调速系统的闭环控制	131
3.9 PID 功能的调试	143
第 4 章 变频器拖动系统及其应用	148
4.1 变频后的电动机	148
4.2 变频器应用的基础知识	156
4.3 变频拖动系统的基本规律	161
4.4 恒转矩负载的变频调速	169
4.5 重力负载的变频调速	175
4.6 恒功率负载的变频调速	186
4.7 二次方律负载的变频调速	194
第 5 章 变频调速的经济效益	203
5.1 拖动系统的节能空间	203
5.2 调速方法与节能效果	205
5.3 变频调速的节能措施	214
5.4 从水泵管路的流体功率看节能	221
5.5 从电动机的轴功率看节能	229
5.6 从电功率看水泵管路的节能	232
5.7 风机变频的节能	235
5.8 全面评价变频调速的经济效益	236
第 6 章 变频器的控制电路	243
6.1 变频器的控制框图	243
6.2 开关电源概述	244
6.3 变频器里的开关电源	248
6.4 CPU 的外围电路	258
6.5 电流的检测与保护	266
6.6 电压和温度的检测	276
6.7 IGBT 的驱动电路	281
第 7 章 变频器的故障、检测与调试	292
7.1 变频器的故障分析	292
7.2 主电路部件的检查与损坏原因	303
7.3 主要控制电路的故障分析	311
7.4 变频调速系统的试验与调试	316

7.5 变频器的整机测量	324
7.6 变频器的抗干扰	330
7.7 家用电器的变频调速	335
附录	340
附录 A 变频调速系统的实验	340
实验 1 变频器通电	340
实验 2 外接端子的基本控制	343
实验 3 变频器各环节的电压和电流	345
实验 4 加、减速实验	347
实验 5 U/f 线的实验	349
实验 6 多挡转速控制	352
实验 7 机械特性实验	353
实验 8 低频负载电流实验	355
实验 9 U 形曲线实验	356
实验 10 恒压供水实验	357
附录 B 几种自制器件	360
1. 整流式电压表	360
2. 外接频率表	361
3. 自制制动电阻	362
4. 自制制动单元	363

第 1 章 变频器主电路

1.1 三相交流异步电动机简介

1.1.1 三相交流异步电动机的构造和原理

1. 构造

三相交流异步电动机是所有电动机中构造最简单的一种，其基本结构如下：

(1) 定子 定子铁心由硅钢片叠成，铁心槽中安置三相绕组。所谓三相绕组，就是三组在空间位置上互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的绕组，如图 1-1a 所示。

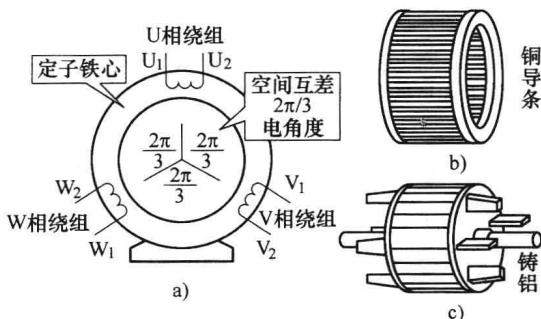


图 1-1 异步电动机的构造

a) 外形 b) 定子 c) 笼型转子

(2) 转子 转子铁心也由硅钢片叠成，铁心槽中安置短路绕组，用得最多的是笼型转子。转子绕组由铜条或铝条构成，两端由铜环或铝环将所有导体短路，如图 b 所示。转子绕组不必和外电路相连，故结构十分简单坚固，是电力拖动领域应用得最多的一种。

2. 原理

(1) 旋转磁场 把时间上互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的三相

交变电流通入到空间上也互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的三相绕组中去, 所产生的合成磁场的中心线总是和电流达到振幅值的绕组轴线相重合:

当 U 相电流达到振幅值时, 磁场的中心线和 U 相绕组的轴线重合, 如图 1-2a 所示;

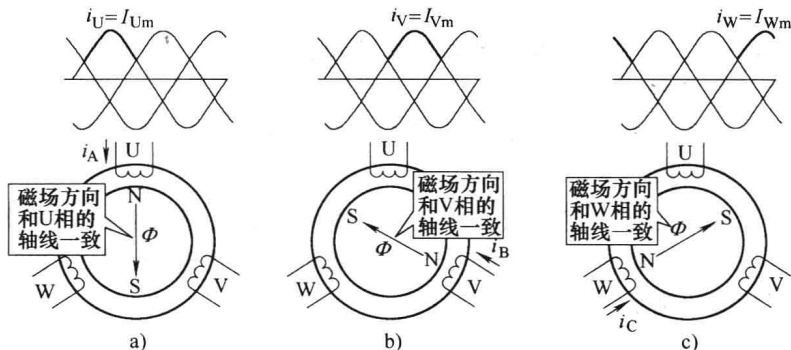


图 1-2 三相电动机的旋转磁场

a) U 相电流达到振幅值 b) V 相电流达到振幅值

c) W 相电流达到振幅值

当 V 相电流达到振幅值时, 磁场的中心线和 V 相绕组的轴线重合, 如图 b 所示;

当 W 相电流达到振幅值时, 磁场的中心线和 W 相绕组的轴线重合, 如图 c 所示。

三相电流不断地交变着, 磁场的中心线就不断地旋转着, 形成旋转磁场。旋转的转速称为同步转速。

(2) 转子旋转原理 旋转磁场被静止着的转子绕组切割, 转子绕组中将产生感应电动势和感应电流, 其方向由右手定则来判定, 如图 1-3a 所示。

转子绕组中的电流又和定子的旋转磁场相互作用, 产生电磁力和电磁转矩, 方向由左手定则决定, 如图 b 所示。由图可知, 电磁转矩的方向和旋转磁场的方向相同。在电磁转矩的作用下, 转子将旋转起来。

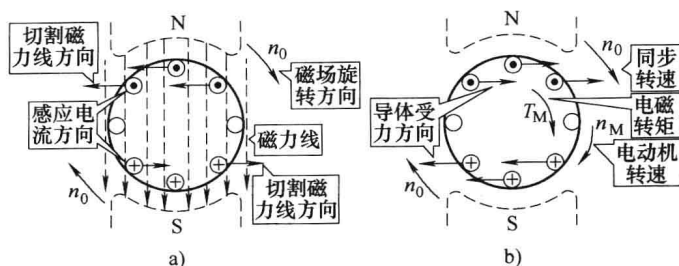


图 1-3 异步电动机的旋转原理

a) 转子绕组切割磁力线 b) 产生电磁转矩

因为转子产生感应电动势和感应电流的前提条件是转子绕组必须切割旋转磁场，所以，转子的转速总要低于旋转磁场的转速，故称为异步电动机。

1.1.2 变频调速原理

1. 异步电动机的基本公式

(1) 同步转速 即旋转磁场的转速，计算公式如下：

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

式中 n_0 ——同步转速 (r/min)；

f ——电流的频率 (Hz)；

p ——磁极对数。

式 (1-1) 表明，当电动机的磁极对数一定时，同步转速与电流的频率成正比；而在额定频率下，同步转速与磁极对数的关系见表 1-1。

表 1-1 同步转速与磁极对数的关系

磁极对数	1 (2 极)	2 (4 极)	3 (6 极)	4 (8 极)	6 (12 极)
同步转速 / (r/min)	3000	1500	1000	750	500

(2) 转差 即转子转速与同步转速之差。

$$\Delta n = n_0 - n_M \quad (1-2)$$

式中 Δn ——转差 (r/min)；

n_M ——转子转速 (r/min)。

(3) 转差率 转差与同步转速之比, 称为转差率

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n_M}{n_0} \quad (1-3)$$

式中 s ——转差率。

(4) 转子转速 n_M 由式 (1-1) 和式 (1-3) 推导如下:

$$n_M = n_0(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (1-4)$$

2. 变频可以调速

由式 (1-4) 知, 改变电流的频率 f , 就改变了旋转磁场的转速 (同步转速), 也就改变了电动机输出轴的转速:

$$f \downarrow \rightarrow n_0 \downarrow \rightarrow n_M \downarrow$$

所以, 调节频率可以调速, 并且可以无级调速, 如图 1-4 所示。

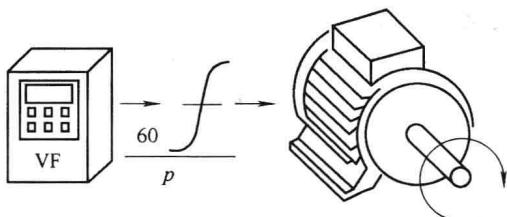


图 1-4 变频可以调速

变频器就是一种可以任意调节其输出电压频率, 使三相交流异步电动机实现无级调速的装置。

例如, 对于一台 $2p = 4$ 的电动机, 有

$$f_x = 0 \sim 50\text{Hz}$$

$$\rightarrow n_0 = 0 \sim 1500\text{r/min}$$

$$\rightarrow n_M = 0 \sim 1440\text{r/min}$$

生产机械常常需要无级调速, 而在变频器问世之前, 异步电动机是无法实现无级调速的。这使它的调速性能远逊于直流电动机。

其实, 变频可以调速的原理, 是从异步电动机发明之日起

就知道了的。但异步电动机发明于 19 世纪 80 年代，而变频器达到能够普及应用的阶段，却直到 20 世纪 80 年代才得以实现，中间相隔了一个世纪。

1.2 电动机在能量转换中的平衡关系

任何能源的做功过程，永远是施加能源的一方，克服接受能源一方反作用的过程。或者说，施加能源的一方总是在克服反作用的过程中做功的。

1.2.1 电动机从电网取用电能时的平衡关系

1. 能量的载体

是电动机定子的三相绕组。

2. 平衡要点

(1) 作用的一方 是电源电压，它要在定子绕组里产生交变电流，并产生交变磁场，如图 1-5 所示；

(2) 反作用的一方 定子电流产生的旋转磁场，也要被定子绕组所“切割”，并产生感应电动势。因为是定子绕组“切割”了自身产生的磁场，所以是自感电动势，具有阻碍电流变化的性质。就是说，它的作用是和外加电压相反的，构成了对外加电压的反作用，通常称为反电动势。

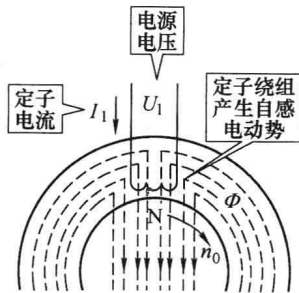


图 1-5 吸收电功率

(3) 做功的标志 电路中有电流。

3. 电动机的定子等效电路

因为电动机的三相绕组的结构是完全相同的，所以，其三相电流是平衡的。

平衡三相电流在任何瞬间的合成电流都等于 0，如图 1-6a 所示。如果把三相绕组连接成星形的话，其中线里是没有电流的。所以，是没有必要接中线的，如图 b 所示。

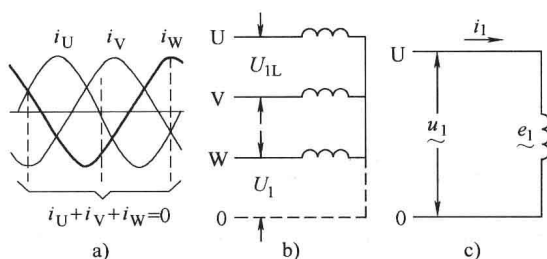


图 1-6 电动机的等效电路

a) 三相合成电流 b) 三相电路 c) 单相电路

由于电动机的三相电流是平衡的，所以，为了简便起见，常用如图 c 所示的一相等效电路来代替。这一相等效电路，是指相线和中线之间的电路。

4. 反电动势的大小

(1) 瞬时值 感应电动势的瞬时值和磁通的变化率成正比：

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-5)$$

式中 e ——感应电动势的瞬时值 (V)；

$\frac{d\Phi}{dt}$ ——磁通的变化率。

(2) 有效值 经过推导，得到感应电动势有效值的计算公式如下：

$$E = K_E f \Phi_m \quad (1-6)$$

式中 E ——反电动势的有效值 (V)；

K_E ——电动势比例常数；

f ——电流的频率 (Hz)；

Φ_m ——磁通的振幅值 (Wb)。

式 (1-6) 表明，反电动势的有效值与频率和磁通的振幅值成正比。如果变化前的磁通波形如图 1-7a 所示，在 Δt 时间内，磁通的变化量是 $\Delta\Phi_1$ ，则：

1) 在磁通振幅值相同的情况下，如频率增大，在 Δt 时间内，磁通的变化量将增加为 $\Delta\Phi_2$ ，如图 b 所示，所以，反电动

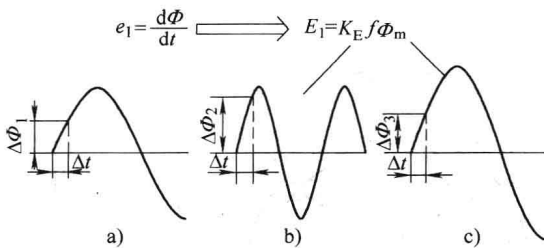


图 1-7 反电动势的有效值

a) 参考波形 b) 频率增加 c) 振幅值增大

势也增大；

2) 在频率相同的情况下，如磁通的振幅值增大，在 Δt 时间内，磁通的变化量将增加为 $\Delta\Phi_3$ ，如图 c 所示，所以，反电动势也增大。

式 (1-6) 表明，在频率一定的情况下，定子绕组反电动势的大小直接反映了主磁通的大小

$$\Phi_1 = K_\Phi \frac{E_1}{f} \quad (1-7)$$

式中 Φ_1 ——主磁通的有效值 (Wb)；

K_Φ ——比例常数。

所以，反电动势也是定子绕组把吸收的电能转换成磁场能的具体体现。

5. 电动势平衡方程

(1) 主磁通和漏磁通 根据所起作用的不同，定子磁通分成两个部分：

1) 主磁通 能够穿过空气隙与转子绕组相链，从而把能量传递给转子的部分，称为主磁通，如图 1-8a 中 Φ_1 所示。对于异步电动机的定子绕组来说，反电动势仅指由主磁通引起的自感电动势。

2) 漏磁通 不能通过空气隙与转子绕组相链，从而不起能量传递作用的部分，称为漏磁通，如图 a 中 Φ_0 所示。漏磁通因为并不传递能量，故在电路中以漏磁电抗的形式出现，如图 b

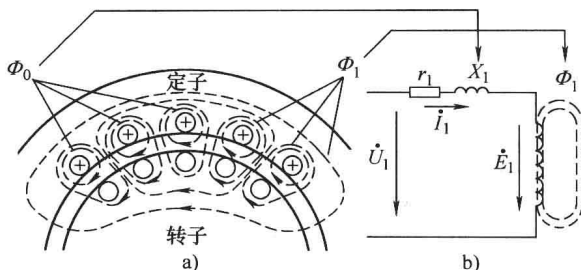


图 1-8 定子侧的电动势平衡

a) 主磁通和漏磁通 b) 磁通在电路中的反映

中 X_1 所示。

(2) 电动势平衡方程 当外加电压做功时,除了要克服反电动势外,还必须克服线圈的电阻和漏磁电抗。所以,在稳定状态(电流的有效值不变)下,电动势的平衡方程如下:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \Delta\dot{U}_1 \quad (1-8)$$

式中 \dot{U}_1 ——相电压的复数值(V);

\dot{E}_1 ——反电动势的复数值(V);

\dot{I}_1 ——定子电流的复数值(A);

r_1 ——定子一相绕组的电阻(Ω);

X_1 ——定子一相绕组的漏磁电抗(Ω);

j ——复数算符;

$\Delta\dot{U}_1$ ——定子一相绕组的阻抗压降(V)。

6. 要点提示

电动势平衡方程说明了:

1) 在电动机的定子电路里,电源电压 U_1 主要是克服了定子绕组的反电动势 E_1 而做功的;

2) 反电动势 E_1 的大小是和频率密切相关的;

3) 阻抗压降 ΔU_1 的大小主要取决于电流 I_1 的大小,和频率的关系不大,常可忽略。

1.2.2 转子从定子侧吸收能量的平衡关系

1. 能量的载体

是电动机的磁路。由定子铁心、转子铁心和空气隙构成，如图 1-9a 所示。

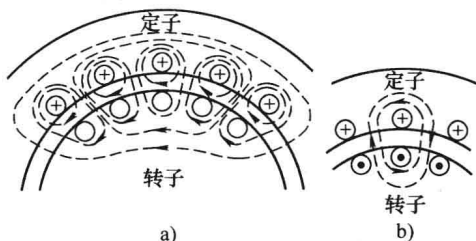


图 1-9 定子和转子电流的磁通

a) 电动机的磁路 b) 转子磁动势的去磁作用

2. 平衡要点

(1) 作用的一方 定子电流的磁动势；

(2) 反作用的一方 当转子绕组中产生感应电流时，根据楞次定律，它要阻碍定子磁通的变化，所以，转子绕组的磁动势是反作用的一方。如图 b 所示；

(3) 做功的标志 磁路内有磁通。

3. 转子绕组的等效电路

(1) 等效过程 笼型异步电动机的转子绕组，由 n 根“笼条”构成，每一根“笼条”为“一相”，故转子电路是 n 相电路，如图 1-10a 所示。这样的电路，是难以和定子电路进行比较和联系的。为了得到能够和定子电路进行比较和联系的等效电路，需要进行两个变换：

1) 相数变换 转子的 n 相电路与定子的三相电路是无法统到一起的。因此，必须用一个等效的三相绕组去代替 n 相绕组，如图 b 所示。在这里，等效的条件是：由等效三相绕组所得到的功率，必须和原来的 n 相绕组得到的总功率相等。

2) 动静变换 因为转子是旋转的，它输出的是电磁转矩 T_M 和转速 n_M ，输出功率为机械功率

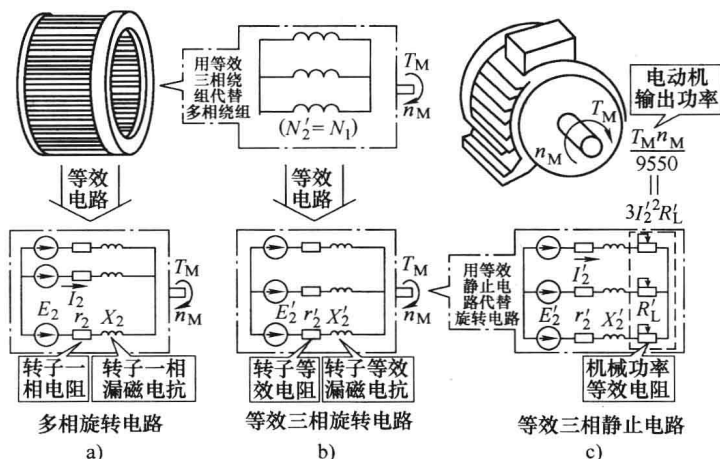


图 1-10 转子电路的等效变换

a) 笼型转子 b) 多相-三相变换 c) 动-静变换

$$P_2 = \frac{T_M n_M}{9550} \quad (1-9)$$

式中 P_2 ——电动机的输出功率 (kW)；
 T_M ——电动机的电磁转矩 (N·m)；
 n_M ——电动机轴上的转速 (r/min)。

所谓“动-静变换”，就是把旋转的、输出机械能的转子等效地变换成静止的“转子电路”。具体方法：

因为机械功率 P_2 是有功功率，所以在电路里串入一个等效的有功元件 R_L ，条件是在 R_L 上所消耗的有功功率应该和电动机输出的机械功率相等（因为是等效电路，所以电路中各参数都缀以“'”）：

$$3I_2'^2 R_L' = \frac{T_M n_M}{9550} \quad (1-10)$$

式中 I_2' ——等效电路中，转子的相电流 (A)；
 R_L' ——与机械负载等效的电阻 (Ω)。

(2) 一相等效电路 和定子相仿，因为三相电路是对称的，所以，在分析时可以只拿一相来进行观察。转子的一相等效电